

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO NÍVEL “A” COM O USO DE FACHADA FOTOVOLTAICA

Marina Espíndola Amorim – marinaamorim2101@gmail.com

Ana Lígia Papst de Abreu¹

Rogério de Souza Versage¹

Tiago de Castro Quevedo²

¹Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis

²Universidade Federal de Santa Catarina, LabEEE

Resumo. *As edificações brasileiras respondem por aproximadamente 50% do consumo de eletricidade. A incorporação de fachadas fotovoltaicas auxilia na diminuição da demanda energética de edificações. Mas, será que a incorporação de painéis fotovoltaicos (PV) à fachada aumenta a carga térmica de condicionamento de ar ao ponto de não ser energeticamente viável? Este artigo tem por objetivo avaliar o impacto térmico e energético no projeto de uma edificação educacional nível A de Eficiência Energética em Florianópolis quando da incorporação de painéis fotovoltaicos na fachada norte. O método de análise foi baseado em simulações computacionais pelo software EnergyPlus. As simulações foram feitas para três casos: (a) caso base, com envoltória vertical (paredes e aberturas) que garantam o nível A da Instrução Normativa Inmetro de Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas; (b) características de envoltória do caso base com sistema fotovoltaico aplicado diretamente sobre a fachada norte; e por último, (c) o caso base com painéis fotovoltaicos integrados na envoltória da fachada norte com sistema de parede dupla ventilada. Os resultados das simulações demonstraram que os casos com sistemas fotovoltaicos na fachada apresentaram um maior consumo de energia de condicionamento de ar quando comparados ao caso base. Porém, a geração de energia anual decorrente do sistema fotovoltaico simulado nos dois casos foi superior à demanda energética do ar condicionado, sendo que os modelos com PV demandaram 8% a menos de energia que o caso base. A colocação de PV em fechamentos verticais piorou o desempenho térmico da edificação. Entretanto, a geração de energia decorrente desta fachada foi suficiente para suprir o aumento no consumo energético de condicionamento de ar. Desta forma, fachadas fotovoltaicas apesar de serem um sistema proativo do ponto de vista de eficiência energética, precisam também ser avaliadas quanto ao seu impacto na carga térmica da edificação.*

Palavras-chave: *Energia Solar, Painéis Solares Integrados na Fachada, edificação escolar energeticamente eficiente*

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as edificações representam mais da metade do consumo de energia elétrica do país (EPE, 2021). Nos Estados Unidos as edificações escolares representam 10,8% do consumo total das edificações, já no Reino Unido essa tipologia é a terceira maior consumidora de energia, ficando atrás apenas dos edifícios comerciais e escritórios. (WANG, 2016). No Brasil ainda não se têm dados de consumo energético especificamente para edificações de uso educacional.

Com a disponibilidade de irradiação solar no Brasil, a geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos tem um grande potencial ainda a ser explorado. Em 2020 houve um aumento de 187% na micro e mini geração distribuídas (MMGD) de energia, sendo a energia solar equivalente a 90,4% desse total. A energia solar teve destaque nesse ano em relação às outras fontes MMGD, com 2.764 GWh de geração e 4.635 MW de potência instalada (EPE, 2021).

Uma das formas de se inserir a geração de energia solar no meio urbano é integrando/aplicando o sistema fotovoltaico às edificações. (GAVIRIA; PEREIRA; MIZGIER, 2013). Os painéis fotovoltaicos (PV) podem ser integrados (BIPV) ou aplicados (BAPV) na cobertura ou nas fachadas das edificações.

Uma das possibilidades de integração do sistema fotovoltaico ao edifício é o uso de fachadas duplas, podendo ser ventiladas ou não. O sistema de fachadas duplas ventiladas é um tipo de revestimento não aderido que pode melhorar o desempenho térmico da edificação. Seu uso pode fornecer uma zona de proteção térmica, economia de energia, proteção sonora e contra o vento e resfriamento noturno. Além disso, o sistema pode contribuir para a redução das cargas térmicas no verão devido à ventilação de ar quente na câmara (CHIVELET; SOLLA, 2010). Quando integrado a um sistema fotovoltaico, o sistema de fachada ventilada pode melhorar ainda mais o desempenho da edificação. O sistema BIPV influencia na transferência de calor por causa da mudança da resistência térmica ao substituir os elementos de construção convencionais (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016).

Em fevereiro de 2021 foi publicada a Instrução Normativa do Inmetro que especifica os novos critérios e métodos para classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua eficiência energética (INI), visando à etiquetagem de edificações. Neste documento são apresentados os procedimentos para a determinação da classificação de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas (INI-C), que pode ser geral, ou parcial. (PBE EDIFICA, 2021). Desde 2014, com a implementação da IN nº2, todas as edificações públicas federais, construídas ou

reformadas devem obrigatoriamente obter a Etiquetagem Nacional de Conservação de Energia (ENCE) Nível “A” (BRASIL, 2014).

No Plano Diretor do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), está previsto um novo bloco de salas de aula e laboratórios para o Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACC). O IFSC por ser uma instituição pública federal, qualquer nova edificação terá que ser avaliada como nível “A” pela ENCE. O trabalho de Quevedo (2019) teve como objeto de estudo este novo bloco para o DACC e determinou diretrizes construtivas do sistema de envoltória para que um projetista saiba quais estratégias de eficiência energética são mais determinantes nas etapas iniciais de projeto. A proposta para este novo bloco acadêmico do DACC/IFSC é não apenas consumir menos energia, mas também destacar o uso de energia solar na envoltória da edificação. Em um trabalho de pesquisa anterior, Abreu et al. (2016) observaram uma avaliação usando a ferramenta *BIPV Design*, que para este novo bloco do DACC/IFSC somente a colocação de painéis fotovoltaicos na cobertura do prédio não seria capaz de atender a demanda anual esperada para a edificação. Entretanto, a adição de painéis solares na fachada, geraria um excedente energético que poderia ser utilizado por outras edificações do Campus.

Para a cidade de Florianópolis, existe o potencial de se usar painéis fotovoltaicos na fachada norte, e nesta fachada incidiria 55% da radiação solar anual. Nas Fachadas leste e oeste, este potencial diminuiu para 45%. (SANTOS, 2013). A localização e orientação, tipo de uso do edifício, cargas elétricas e os códigos de construção e segurança locais são parâmetros de projeto importantes a serem considerados nos sistemas BIPV (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016). Ao substituir elementos convencionais da construção por placas fotovoltaicas, o sistema BIPV tem grande influência na transferência de calor pela envoltória da edificação (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2016). Os sistemas de pele dupla com PV integrados podem melhorar o desempenho energético da envoltória, uma vez que diminuem as perdas por transmissão no inverno e podem reduzir os ganhos solares no verão (BLOEM *et al.*, 2012). O uso de sistemas de fachadas ventiladas é uma ótima chance de integrar painéis fotovoltaicos na edificação. A substituição do material da pele externa por PVs pode ser feita de duas formas: apoiados em vidro ou em suportes opacos. Na primeira opção o vidro laminado ou temperado da pele externa é substituído por um painel de vidro laminado com células fotovoltaicas. Já nas fachadas opacas os módulos fotovoltaicos são aderidos ao pano opaco externo (CHIVELET; SOLLA, 2010). É importante que o uso do sistema fotovoltaico integrado seja discutido desde o início do processo de projeto da edificação. Além disso, pode proporcionar economia de material e mão de obra devido a substituição de materiais, e reduzir também os custos com energia elétrica.

O sistema construtivo de fachadas duplas ventiladas é pouco usado no Brasil. Barbosa (2015) estudou o desempenho térmico de fachadas duplas ventiladas em diferentes condições climáticas brasileiras para edificações naturalmente ventiladas nos ambientes internos de edificações de uso de escritórios. Para as zonas bioclimáticas brasileiras no sul do Brasil, esta pesquisadora mostra a indicação do nível de aceitabilidade térmica das simulações feitas com níveis superiores a 90% quando a parede dupla é colocada na fachada norte. O uso combinado de estratégias de sistemas de ventilação natural com condicionamento de ar pode ser usado para reduzir o desconforto em dias extremamente quentes. (BARBOSA; IP, 2016).

Em edificações comerciais, por exemplo, as maiores demandas de ar condicionado coincidem com as horas de alto nível de irradiação solar (SCHNEIDER; SORGATO; RÜTHER, 2018). Observa-se que as fachadas duplas ventiladas têm potencial de uso na cidade de Florianópolis, melhorando inclusive o desempenho térmico no período mais frio. Como apresentado por Chivelet e Solla (2010), a câmara de ar presente nas fachadas duplas ventiladas tem função de diminuir as temperaturas das camadas sobrepostas, contribuindo para um alto rendimento das células fotovoltaicas. Uma câmara de ar de 10 a 15 cm entre a fachada do edifício e o sistema fotovoltaico possibilitam que a temperatura dos PVs se mantenha em níveis baixos, apresentando melhor desempenho (AGATHOKLEOUS e KALOGIROU, 2016). Assim, por serem ventilados, os sistemas de fachada dupla são apropriados para integração com um sistema fotovoltaico.

Uma edificação com preocupações de sustentabilidade pode ser um laboratório para avaliação real de sistemas mais adequados ao local (CHATZIPANAGI; FRONTINI; VIRTUANI, 2016) e até uma edificação que produz mais energia renovável do que a energia necessária para o funcionamento e operação da própria edificação (ZOMER et al., 2020).

Com relação à eficiência energética nas edificações, é nos primeiros esboços de projeto onde se pode cometer os erros mais custosos para o resto da vida útil da edificação, e até mesmo impossíveis de serem alterados (KRESE et al., 2018). Também são nas etapas iniciais onde se tem o maior potencial para serem feitas as melhores propostas para um bom desempenho térmico energético da edificação (LAMBERTS et al., 2014; PEDRINI e SZOKOLAY, 2004). Avaliar o impacto do sistema construtivo da fachada é importante já na abordagem inicial da proposta, pois permite algumas previsões para a fase de projeto arquitetônico. Nesta fase inicial, não é importante a precisão do consumo de energia da edificação, mas uma estimativa geral do desempenho térmico energético. (KRESE et al., 2018). Por isso, este trabalho tem dois principais questionamentos: aumentar-se-á a carga térmica interna da edificação a colocação dos painéis fotovoltaicos na fachada? A geração de energia solar será suficiente para a demanda de energia para o condicionamento de ar? Com respostas a estes questionamentos, os projetistas podem decidir com embasamento quanto à adoção ou não deste sistema antes mesmo de se iniciar esboços do projeto arquitetônico.

O objetivo deste artigo é avaliar o impacto térmico e energético no projeto de uma edificação educacional nível A de Eficiência Energética em Florianópolis quando da incorporação de painéis fotovoltaicos na fachada norte, antes mesmo do desenvolvimento do projeto arquitetônico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este item do artigo mostra os métodos empregados na avaliação termo energética da edificação objeto de estudo, e a avaliação do potencial da geração de energia dos sistemas fotovoltaico colocadas na fachada norte da edificação. As análises foram feitas através de simulação computacional, com o auxílio do software EnergyPlus versão 9.4.0, e os resultados e gráficos foram feitos usando planilhas do Excel.

2.1 Objeto de Estudo

O objeto de estudo deste artigo é um novo bloco de salas de aula e laboratórios para o Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACC). Quevedo (2019) determinou diretrizes construtivas do sistema de envoltória para que esta edificação ao ser projetada, atinja nível “A” na ENCE. Foram feitas 720 simulações, variando: disposição das zonas térmicas; percentual de abertura da fachada; tipo de vidro; absorvância solar; características térmicas das paredes e cobertura; e sombreamento. Os parâmetros construtivos que tiveram maior influência/relação na carga térmica total da edificação foram o sombreamento, o percentual de área de aberturas das fachadas e a absorvância solar. As outras variáveis ganham mais ou menos importância dependendo da variação das três principais citadas. Como a cobertura possui uma área pequena em relação a área de fachada, esta não apresentou uma relevância significativa na carga térmica total de resfriamento da edificação.

Como ainda não há definição de forma e altura para o projeto, considerou-se o layout apresentado por Quevedo (2019). O novo bloco será implantado na frente do atual bloco do DACC, nos fundos do terreno do IFSC – Campus Florianópolis, como mostra a Figura 1.



Figura 1 – Implantação proposta para o novo bloco do DACC.
Fonte: Imagem adaptada do Google Maps

Pela área disponível para implantação do novo bloco, observa-se que as maiores fachadas da nova edificação estarão voltadas para norte/sul. A volumetria considerada teve suas dimensões definidas de acordo com o plano diretor interno do IFSC Campus Florianópolis, com dimensões 15 por 60 metros. Além disso, a altura foi definida de acordo com o Plano Diretor de Florianópolis, a Lei 482 de 2014, adotou-se então uma altura de 22 metros, sendo o pavimento térreo com 4 metros de pé direito e 6 pavimentos tipo com 3 metros de pé direito cada (QUEVEDO, 2019).

A planta do modelo adotado é dividida em zonas periféricas/perimetrais e uma zona do núcleo da edificação. As zonas perimetrais são diretamente influenciadas pela envoltória do edifício, já o núcleo não sofre influência significativa das fachadas, por isso pode ser uma zona única (ASHRAE *standard* 90.1 2016 - Apêndice G). A Figura 2 representa o zoneamento em uma planta esquemática do pavimento tipo do objeto de estudo. As zonas 1, 2, 3 e 4 são as zonas perimetrais, e a zona 5, o núcleo.

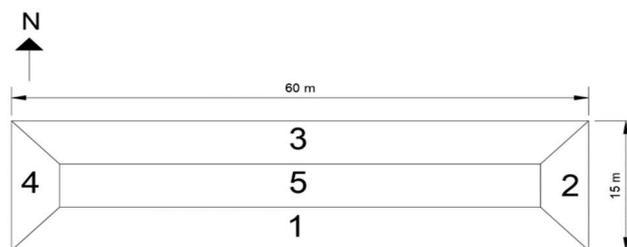


Figura 2 – Esquema do zoneamento da planta do novo bloco do DACC.
Fonte: Adaptado de Quevedo (2019).

Dentre todos os modelos simulados na pesquisa de Quevedo (2019), foi escolhido um modelo que resultou em nível “A” de acordo com os parâmetros da Instrução Normativa Inmetro – Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). Manteve-se o padrão de ocupação, acionamento do sistema de iluminação e funcionamento do ar condicionado adotado por Quevedo (2019). Para modelagem do sistema de ar condicionado foi usado um objeto *template* do *EnergyPlus* do tipo PTHP para as zonas ocupadas. A Tab. 1 apresenta os valores das cargas internas adotadas.

Tabela 1 - Cargas internas

Parâmetro	Valor
Ocupação	1,5 m ² por pessoa
Iluminação	15,5 W/m ²
Equipamentos internos	9,7 W/m ²

A partir do modelo de Quevedo (2019) foram desenvolvidos 3 casos para o desenvolvimento deste artigo: (a) um caso base, que é um dos modelos com resultado “nível A”, porém sem sombreamento; (b) um modelo com sistema fotovoltaico aplicado em fachada simples; (c) um modelo com sistema fotovoltaico aplicado em fachada dupla ventilada. Nos dois casos onde há sistema fotovoltaico, este será aplicado apenas na fachada norte. Os modelos possuem 6.300 m² de área total, sendo 4.550 m² de área condicionada. A Figura 3 representa o modelo base. Uma das adaptações feitas no modelo foi a mudança de posição das janelas, mantendo o percentual de abertura da fachada de 30%. Essa troca foi feita para viabilizar a configuração da parede ventilada e dos painéis fotovoltaicos no *EnergyPlus*, uma vez que é preciso conectar uma superfície a esses objetos. Com a nova modelagem, a área de fachada sem janelas é uma superfície só, evitando ter que dividir a fachada em diversas superfícies diferentes.

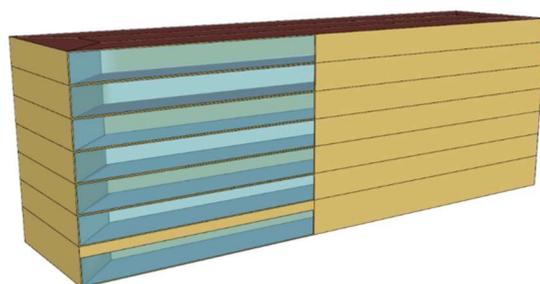


Figura 3 - Modelo geométrico do objeto de estudo.

A simulação foi definida para o período de um ano, de 01 de janeiro a 31 de dezembro, desconsiderando feriados e o período de férias. Como a edificação é localizada em Florianópolis, foi usado um arquivo climático SWERA da cidade.

Para a modelagem do sistema fotovoltaico no *EnergyPlus* são necessários cinco diferentes configurações, são eles: *Generator: Photovoltaic; Photovoltaic Performance: Simple; Electric Load Center: Generators; Electric Load Center: Inverter: Simple; e Electric Load Center: Distribution.*

No *Generator: Photovoltaic*, foram definidas as superfícies onde estão instalados os módulos e o tipo de objeto para representar a performance desses painéis. Outra opção desse objeto é o modo de integração de transferência de calor, que pode ser preenchido como *Integrated Exterior Vented Cavity*, ou seja, uma cavidade ventilada atrás dos painéis. Como esse trabalho é uma análise preliminar do projeto e não existe definição do tipo de painel que pode ser usado, não foi considerado para os sistemas fotovoltaicos a ventilação natural atrás do sistema, o que melhoraria sua eficiência.

Photovoltaic Performance: Simple, definiu-se a fração da superfície com módulos ativos e a eficiência das células, que foi considerado um valor fixo.

O objeto *Electric Load Center: Generators* lista os geradores de energia elétrica que foram considerados na simulação.

O inversor é configurado no objeto *Electric Load Center: Inverter: Simple*, onde é definido uma escala de disponibilidade e a eficiência do inversor. Por último, as informações do painel e inversor configurados nos outros objetos são conectadas no objeto *Electric Load Center: Distribution*. A Tab. 2 mostra os parâmetros considerados na configuração dos objetos do sistema fotovoltaico.

Tabela 2 - Dados de entrada da caracterização do sistema fotovoltaico

Campo	Valor
Fração da área com módulos ativos	1
Eficiência das células	0,12
Eficiência do inversor	1

Para a configuração da fachada ventilada no *EnergyPlus* são necessários dois objetos: *Surface Property: Other Side Conditions Model*; e *Surface Property: Exterior Natural Vented Cavity*. Todas as informações adotadas para a configuração da fachada ventilada no *EnergyPlus* estão apresentadas na Tab. 3. Esses valores foram baseados na monografia de Netto (2018), com algumas adaptações para o modelo deste trabalho. A absorção e a rugosidade da parede exterior foram alteradas para condizer com os painéis solares da pele externa.

Tabela 3 - Dados de entrada da caracterização da fachada ventilada

Campo	Valor
Fração da área de aberturas	0,1
Emissividade térmica do material da parede exterior	0,9
Absorção solar da parede exterior	0,92
Escala de altura para ventilação	0,5
Espessura efetiva da cavidade atrás da parede exterior	0,1
Razão da área de superfície real para área de superfície projetada	0,9
Rugosidade da superfície exterior	Muito liso
Eficácia das aberturas em relação ao vento	0,6
Coefficiente de descarga para aberturas	0,65

Na Tab.3, a fração de área de aberturas é a fração de área para a parte do defletor que consiste em aberturas. A escala de altura para ventilação é a altura do ponto médio da abertura inferior ao nível de pressão neutra. A razão da área de superfície real para área de superfície projetada é o fator que leva em consideração a área de superfície extra resultante de uma superfície defletora irregular. A eficácia das aberturas em relação ao vento é o valor para o coeficiente usado para determinar as trocas de ar naturais do vento. E o coeficiente de descarga para aberturas é o valor usado para determinar as trocas de ar naturais da fluidez, dependendo da geometria da abertura. (ENERGYPLUS, 2020).

O modelo teste possui dimensões 4,5 x 4,5 m e pé direito de 3 m. Todas as paredes, piso e cobertura foram configurados como concreto de 15 cm e como superfícies adiabáticas, com exceção da fachada que será ventilada. O modelo não tem janelas nem cargas internas. Esse teste foi desenvolvido dessa forma com o objetivo de avaliar apenas a superfície equivalente a fachada ventilada, sem outras interferências.

Três simulações foram desenvolvidas a partir do modelo de teste: o Modelo 1, sem parede ventilada; o Modelo 2, com parede ventilada utilizando o objeto “*SurfaceProperty: ExteriorNaturalVentedCavity*”; e o Modelo 3, com parede ventilada usando os objetos “*AirflowNetwork*”. A câmara ventilada possui 10 cm de espessura.

Os Modelos 1 e 2 não exigem ajustes geométricos no modelo, já para o Modelo 3 fez-se necessário adicionar duas zonas equivalentes à cavidade ventilada. Esses ajustes foram realizados no software *Sketchup* aliado ao *plug-in Euclid*. A transmitância térmica (“U”) do sistema de fechamento vertical (parede) do caso base foi de 2,57 W/m²K, no modelo com sistema fotovoltaico aplicado na fachada o valor de “U” foi de 0,45 W/m²K, e no modelo com sistema fotovoltaico aplicado em fachada dupla ventilada foi estimado o valor de “U” = 0,42 W/m²K. Os modelos com PV foram simulados com absorvância solar de 92% nos painéis, enquanto as paredes têm valor de absorvância solar de 30%.

2.2 Critérios de análise e comparação

Foram extraídos dados de temperatura externa e temperatura interna média do ar da zona, para comparar os resultados dos três modelos.

O consumo de energia dos três modelos foi determinado por um dado de saída da simulação no *EnergyPlus*. Esses dados são divididos em categorias de usos finais, sendo elas: resfriamento, aquecimento e ventiladores, que somados são o consumo do ar condicionado; iluminação; e equipamentos. Os resultados são anuais em kWh.

A carga térmica foi calculada dividindo o consumo por uso final anual (kWh) pela área total da edificação (m²). Esses cálculos foram feitos com auxílio do *Excel*, e os dados para calcular foram retirados da simulação do *EnergyPlus*.

O balanço térmico foi calculado para analisar os ganhos e perdas de calor através dos componentes opacos da edificação. Os relatórios de saída do *EnergyPlus* fornecem os dados de ganho/perda de calor referente a cada superfície, e o ganho por convecção referente à iluminação, equipamentos, pessoas e infiltração. (MELO; LAMBERTS, 2008). Os resultados são obtidos em kWh por mês.

Os dados de consumo diário de energia em kWh simulados foram plotados em relação às temperaturas médias externas. Para montar o gráfico foram excluídos dados de consumo do final de semana e do período de férias, considerando que nesses dias não haverá uso de condicionamento de ar.

A determinação da geração de energia pelo sistema fotovoltaico é um dado de saída da simulação do *EnergyPlus*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A geração de energia dos sistemas fotovoltaicos em kWh foram estimadas através da simulação do *EnergyPlus*. O sistema fotovoltaico está presente nos modelos com fachada simples + PV aplicado e com fachada dupla ventilada + PV

integrado. A área de aplicação do sistema fotovoltaico nos dois modelos é a mesma, cerca de 760 m² de área de painéis fotovoltaicos, e o mesmo tipo de painel foi utilizado para os dois modelos, desta forma, os dois modelos apresentaram a mesma geração de energia na simulação: 94.766 kWh.

O balanço de energia em kWh de cada modelo foi calculado através da simulação do *EnergyPlus*. Esses valores são calculados levando em consideração a geração de energia dos modelos com sistema fotovoltaico e o consumo de energia. O balanço foi calculado subtraindo a geração de energia pelo sistema fotovoltaico do consumo final do modelo. Os valores do balanço de energia estão apresentados na Tab. 4.

Tabela 4 – Balanço de energia

Usos	Base (kWh)	Parede Simples + PV (kWh)	Parede Ventilada + PV (kWh)
Ar-condicionado	459.167,06	423.143,53	425.018,66
Iluminação	255.452,40	233.542,84	233.581,90
Equipamentos	386.622,60	353.462,87	353.521,99
Total	1.101.242,06	1.010.149,23	1.012.122,54

A Fig. 4 mostra os resultados do balanço energético por uso final dos três modelos, em kWh.

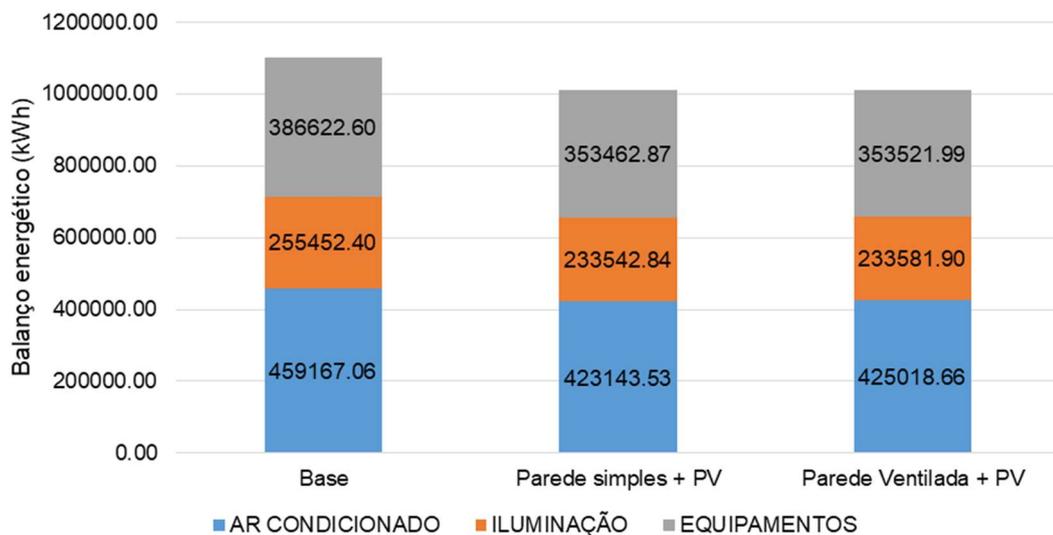


Figura 4 - Balanço energético por uso final

Com o balanço de energia considerando a geração dos sistemas fotovoltaicos, o modelo que obteve o maior valor de balanço de energia foi o base, seguido da parede ventilada com PV, e o modelo com menor balanço foi o com parede simples e sistema fotovoltaico aplicado. Para os três casos o consumo de ar condicionado representa 42% do consumo total, a iluminação 23% e os equipamentos 35%.

A partir dos ganhos e perdas de energia e da área do objeto de estudo foram calculadas as cargas térmicas equivalentes a cada uso de cada modelo, e os resultados estão apresentados na Fig. 5.

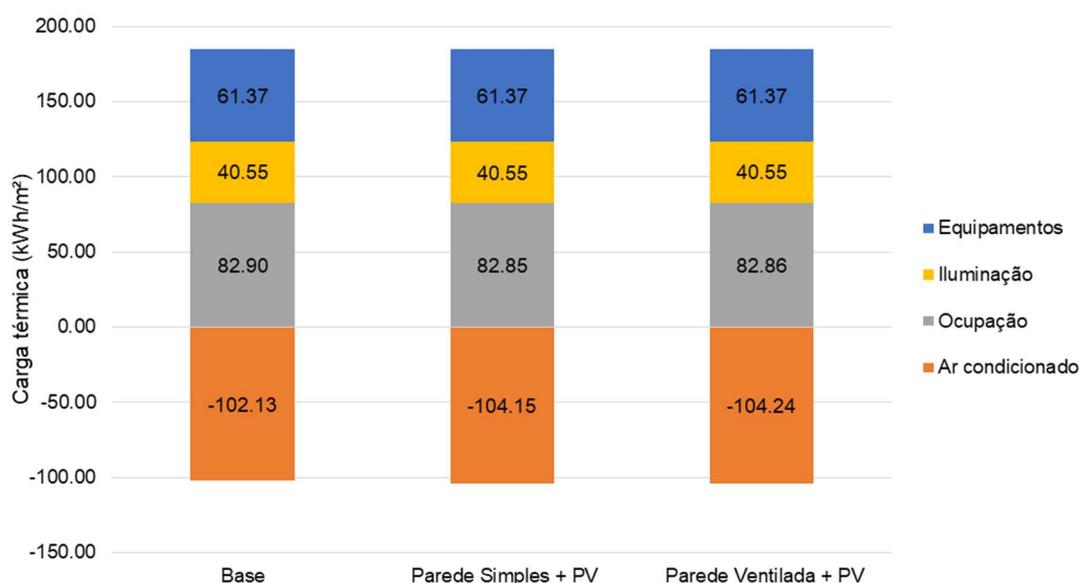


Figura 5 – Cargas Térmica

Percebe-se que as cargas térmicas de ar condicionado nos modelos com PV são mais elevadas que o caso base. As cargas térmicas de iluminação, equipamentos e ocupação foram equivalentes para os três modelos. Os valores para os modelos com sistema fotovoltaico foram muito próximos, porém a carga térmica de ar condicionado para o modelo com parede ventilada é um pouco maior que o caso com parede simples + PV.

O balanço térmico dos três casos está demonstrado através dos resultados anuais de ganhos e perdas térmicas pela simulação do *EnergyPlus*. Os resultados são apresentados na Fig. 6.

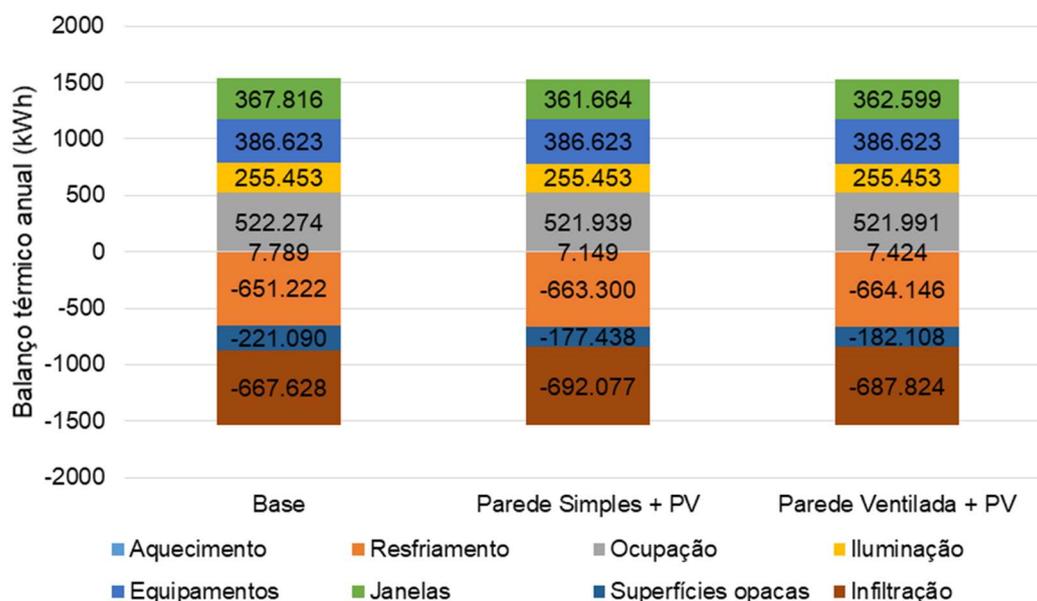


Figura 6 – Balanço térmico anual

A perda de calor pelas superfícies opacas foi maior no caso base do que nos casos com PV, o que é desejável para um clima subtropical de Florianópolis. Visto que, a necessidade de resfriamento foi um pouco mais de 2kWh/m² nos casos com PV na fachada. O balanço térmico para aquecimento é o menor valor absoluto dos itens analisados, entretanto, o caso base apresentou o maior valor.

Para avaliar se as paredes com PV aumentam o isolamento térmico, impedindo que parte do calor seja perdido por essas superfícies nos períodos mais quentes, e consequentemente aumentando o consumo do uso de ar condicionado para resfriamento, os dados de consumo diário de energia foram plotados em função das temperaturas médias diárias (Fig. 7).

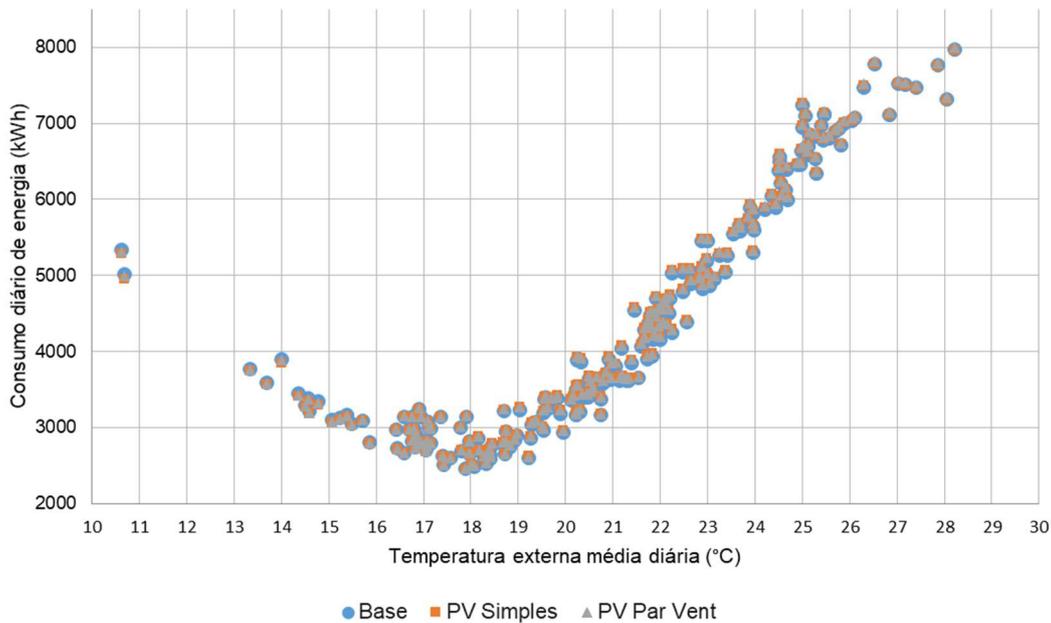


Figura 7 Consumo diário de energia dos modelos em função da temperatura média diária externa

Verificou-se que para temperaturas externas médias diárias de até 18°C, o consumo de energia dos modelos com sistema fotovoltaico foi mais baixo quando comparado com o caso base. Porém, a partir dos 18°C de temperatura média diária, os casos com PV passam a consumir mais energia que o caso base. A baixa transmitância térmica (“U”) das paredes dos modelos com PV, faz com que estes atuem como um isolamento térmico no período noturno. Esta carga térmica acumulada, aumenta a necessidade do uso de ar condicionado durante o dia, o que faz com o que o consumo energético aumente com temperaturas externas mais elevadas. Além disso, a região da fachada com PV nos modelos simulados tem valor de absorptância solar três vezes maior (0,92) do que as paredes do caso base (0,3), o que resulta em temperaturas superficiais externas mais elevadas na fachada norte.

A Fig. 8 mostra a diferença de temperatura na superfície externa dos painéis fotovoltaicos nos modelos com fachada simples e ventilada. Observa-se pela Fig.8 que as temperaturas superficiais dos painéis fotovoltaicos no modelo não ventilado são mais altas do que no modelo com parede dupla ventilada. A temperatura superficial média anual do painel não ventilado é 28,66°C, e a do painel ventilado é 27,05°C.

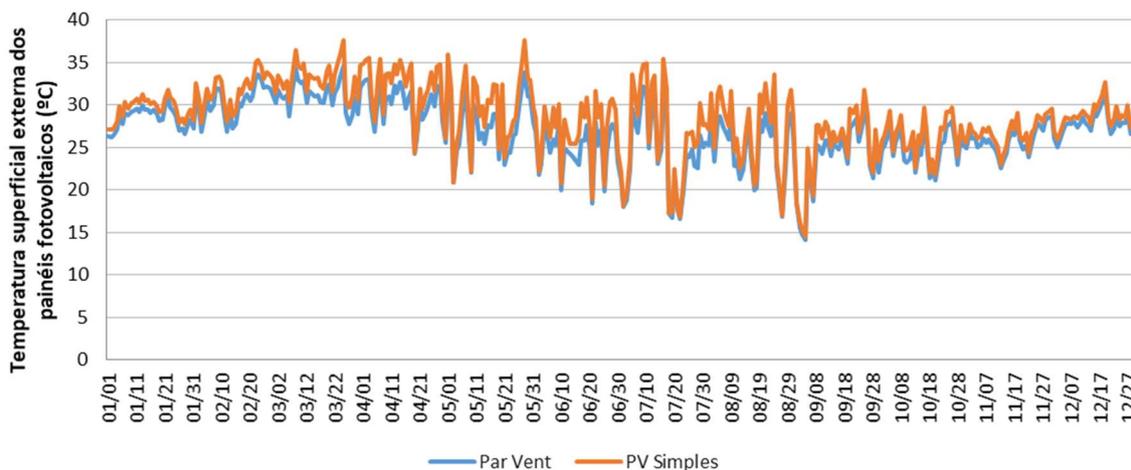


Figura 8 - Temperatura superficial dos painéis fotovoltaicos nas fachadas

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas etapas iniciais de projetos os gastos são mínimos quando se avalia as diferentes estratégias passivas, ativas e proativas, visando um bom desempenho termo energético da edificação. A simulação computacional é uma ferramenta que ajuda a prever e avaliar o comportamento da edificação, podendo comparar diferentes tipos de sistemas construtivos,

por exemplo. Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais referentes a estudos iniciais de uma edificação de uso educacional, comparando três casos de sistemas de vedação diferentes: um caso base, com parede simples e ENCE Nível “A”; um caso com parede simples e painéis fotovoltaicos aplicados sobre a fachada norte; e o último com parede dupla ventilada, sendo o revestimento externo de painéis fotovoltaicos.

Os sistemas fotovoltaicos dos dois casos avaliados foram o mesmo, aplicado na mesma área, sendo assim a geração de energia dos dois casos foi a mesma. Porém há diferença na temperatura superficial dos painéis nos dois casos, os painéis do modelo ventilado têm temperatura superficial em média 1,6°C mais baixa que os painéis no modelo com fachada simples. Essa diferença pode resultar em uma maior eficiência dos painéis com menor temperatura, entretanto essa ventilação no painel não foi considerada neste trabalho.

Com relação às cargas térmicas de ar condicionado, os dois modelos com PV apresentaram valores mais elevados que o caso base, sendo que a carga térmica de ar condicionado no modelo com parede ventilada é um pouco maior que o caso com parede simples + PV. A incorporação de PV na fachada de uma edificação com fechamentos verticais já eficientes, aumenta o isolamento térmico deste elemento construtivo, dificultando a perda da carga térmica interna nos períodos mais quentes do ano, e aumentando o consumo energético do condicionamento de ar.

Com relação ao consumo de energia anual, o caso base apresentou o maior balanço energético. O caso com parede simples + PV consumiu cerca de 8,3% a menos que o caso base, e o caso com parede dupla ventilada + PV aproximadamente 8,1% a menos que o caso base, considerando a geração de energia do sistema fotovoltaico. Essas reduções do balanço de energia resultaram em uma redução de 7,8% na carga térmica de condicionamento de ar para o caso com parede simples + PV, e de 7,4% para o caso com parede dupla ventilada + PV, em comparação ao caso base.

Outra questão que pode ocasionar o aumento das cargas térmicas de condicionamento de ar dos modelos com PV é a absorvância solar elevada dos painéis (0,92) instalados na fachada norte, sendo que no caso base as paredes têm valor de absorvância solar de 0,3.

Para o objeto de estudo, a adoção de painéis fotovoltaicos na fachada, piorou o desempenho térmico da vedação vertical com temperaturas médias diárias elevadas (acima de 18°C), havendo a necessidade de maior consumo de ar condicionado para resfriamento. Apesar dos modelos com PV integrados na fachada norte terem apresentado um pior desempenho térmico comparado com o modelo base, com a geração de energia esses modelos possuem anualmente um menor balanço energético comparado ao caso base. Além disso, considerando que a geração de energia poderá ser ainda maior por conta da menor temperatura superficial e da ventilação dos painéis, a estratégia de parede dupla ventilada com painéis fotovoltaicos como pele externa na parede norte do novo bloco para o DACC demonstra-se como uma solução viável.

Desta forma, apesar de fachadas fotovoltaicas serem consideradas sistemas proativos na eficiência energética, estes precisam ser avaliados quanto ao seu impacto na carga térmica da edificação. Sendo um importante aspecto a ser avaliado nas etapas iniciais de um projeto que pretende ser referência de eficiência energética e sustentabilidade. Para este trabalho foi estudado apenas um tipo de uso de sistema fotovoltaico integrado, nas fachadas. Futuramente serão avaliados a integração de painéis fotovoltaicos em brises e correlacionando com cores de painéis fotovoltaicos de mais baixa absorvância solar.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A.L.P., et al. Metodologia de avaliação da energia solar antes dos primeiros esboços. Porto Alegre: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2016. v. 16.
- AGATHOKLEOUS, Rafaela. A.; KALOGIROU, Soteris A. Double skin facades (DSF) and building integrated photovoltaic (BIPV): A review of configurations and heat transfer characteristics. *Renewable Energy*, 2016. v. 89, p. 743–756.
- ASHRAE (FIRM). Standard 90.1 user’s manual : ANSI/ASHRAE/IES standard 90.1-2016 : energy standard for buildings except low-rise residential buildings : I-P and SI. [S.l.: s.n.], 2016.
- BARBOSA, S. Thermal performance of naturally ventilated office buildings with double skin façade under Brazilian climate conditions. 2015. n. November, p. 182.
- BARBOSA, S., IP, Kenneth. Predicted thermal acceptance in naturally ventilated office buildings with double skin façades under Brazilian climates. *Journal of Building Engineering*, 2016. v. 7, p. 92–102.
- BLOEM, J. J. et al. An outdoor Test Reference Environment for double skin applications of Building Integrated Photovoltaic Systems. *Energy & Buildings*, 2012. v. 50, p. 63–73.
- BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação. Instrução Normativa no 02, de 04 de junho de 2014. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit.
- CHATZIPANAGI, A.; FRONTINI, F.; VIRTUANI, A. BIPV-temp: A demonstrative Building Integrated Photovoltaic installation. *Applied Energy*, 2016. v. 173, n. December 2018, p. 1–12.
- CHIVELET, N. M.; SOLLA, I. F. Técnicas de Vedação Fotovoltaica na Arquitetura. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- ENERGYPLUS. EnergyPlus Engineering Reference. U.S. Department of Energy.2020.

- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese / ano base 2020. Rio de Janeiro: 2021. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em 17 ago. 2021.
- GAVIRIA, L. R.; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay; MIZGIER, M. O. Influência da configuração urbana na geração fotovoltaica com sistemas integrados às fachadas. *Ambiente Construído*, 2013. v. 13, n. 4, p. 07–23.
- KRESE, G. et al. Determination of a Building's balance point temperature as an energy characteristic. *Energy*, 2018. v. 165, p. 1034–1049.
- LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O.R. Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: 2014.
- MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. O Método do Balanço Térmico Através de Simulação Computacional no Programa EnergyPlus. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2008.
- NETTO, H. W. Simulação Computacional do Desempenho Térmico de Uma Edificação com uso de fachada ventilada. Curitiba: [s.n.], 2018.
- PBE EDIFICA. Nova Instrução Normativa Inmetro. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/nova-ini>. Acesso em: 05 out. 2021.
- PEDRINI, A., SZOKOLAY, S. Recomendações para o desenvolvimento de uma ferramenta de suporte às primeiras decisões projetuais visando ao desempenho energético de edificações de escritório em clima quente. *Ambiente Construído*, 2004.
- QUEVEDO, T. C. Simulações paramétricas para determinação de diretrizes construtivas para desempenho energético de um prédio educacional. 2019. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- SANTOS, I. P. Dos. Desenvolvimento De Ferramenta De Apoio À Decisão Em Projetos De Integração Solar Fotovoltaica À Arquitetura. Florianópolis: [s.n.], 2013.
- SCHNEIDER, K.; SORGATO, M. J.; RÜTHER, R. Viabilidade Técnica e Econômica da Aplicação de Módulos Fotovoltaicos (FV) De Telureto de Cádmio (Cdte) Em. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018, 2018.
- WANG, J. C. A study on the energy performance of school buildings in Taiwan. *Energy and Buildings*, 2016. v. 133, p. 810–822. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.036>>.
- ZOMER, C.; CUSTÓDIO, I.; GOULART, S.; MANTELLI, S.; MARTINS, G.; CAMPOS, R.; PINTO, G.; RÜTHER, R. Energy balance and performance assessment of PV systems installed at a positive-energy building (PEB) solar energy research centre. *Solar Energy*, 2020. v. 212, p. 258–274.

THERMAL AND ENERGY PERFORMANCE EVALUATION OF AN ENERGY EFFICIENT BUILDING IF PHOTOVOLTAIC PANELS ARE ADD AT FAÇADE

Abstract. *In Brazil, buildings are responsible for 50% of electricity consumption. The use of photovoltaic (PV) façades can reduce the energy demand of tall buildings; however, a building with vertical envelope energy efficiency, could the use of PV on the façade increase the thermal load of air conditioning, and prevent energy gain? This article aims to evaluate the thermal and energy impact in the design of an energy efficiency educational building at Florianópolis if photovoltaic panels were added in the north façade. The thermal and energetic simulations were run at the EnergyPlus software. Three cases were simulated: (a) base case, with vertical envelope (walls and openings) with characteristics that guarantee level A of the Inmetro Normative Instruction for Classification of Energy Efficiency in Commercial, Service and Public Buildings; (b) envelope characteristics of the base case add a photovoltaic system applied directly on the north façade; and finally, (c) the previous case with photovoltaic panels integrated in the vertical envelope with a ventilated double skin façade. The results of the simulations had shown that the cases with photovoltaic systems on the façade had a higher air conditioning energy consumption when compared to the base case. However, the cases with a simulated PV system have annually consumed 8% less energy than the base case. In the present research, the placement of PV vertically at an energy efficient building envelope has worsened the thermal performance. Though, the energy generation resulting from this façade is enough to supply the increase in the energy consumption of air conditioning. Despite the photovoltaic façade being a proactive system at energy efficiency building concepts, it should also be evaluated in terms of its impact on the building's thermal load.*

Key words: *Solar Energy, Integrated Solar Panels at Façade, Educational Energy Efficient Building*